Supplément aux

ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

VINGT-TROISIÈME ANNÉE ■ NOVEMBRE 1970 ■ N° 275

Série : BÉTON. BÉTON ARMÉ (113)

INFLUENCE DE LA DISTRIBUTION DES ARMATURES DANS LES DALLES CARRÉES EN BÉTON ARMÉ

par **J. R. ROBINSON**
Ingénieur Général des Ponts et Chaussées
Professeur honoraire à l'École Nationale des Ponts et Chaussées
Directeur de l'IRABA

et **Cherif MÉROUANI**
Ingénieur E.N.I. Alger
Diplômé du CHEBAP
Docteur-Ingénieur

1967

INSTITUT DE RECHERCHES APPLIQUÉES DU BÉTON ARMÉ (I.R.A.B.A.)
INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

RÉSUMÉ

Six dalles carrées simplement posées sur leur contour et quatre panneaux carrés nervurés reposant sur leurs angles ont été essayés sous charge uniforme. Les dalles simples et les dalles des panneaux, de mêmes dimensions, comportaient le même volume d'armatures disposées de manières différentes. Les résultats conduisent à une mise en garde contre des diminutions excessives de la densité des armatures vers les bords.

ZUSAMMENFASSUNG

Sechs quadratische, einfach auf ihrem Umfang ruhende, Platten und vier quadratische, gerippte, auf ihren Ecken ruhende Platten, wurden unter einheitlicher Belastung getestet. Die einfachen Platten und die Rippenplatten, gleicher Abmessung, enthielten das gleiche Volumen an Bewehrungen, jedoch in verschiedener Weise eingelegt. Die Ergebnisse stellen eine Warnung dar gegen eine zu starke Verringerung der Bewehrungsdichte am Rande der Platten.

SUMMARY

Six square slabs simply supported on their boundary and four square ribbed panels resting on their angles were tested under a uniform load. The simple slabs and the panel slabs, of the same dimensions, had the same volume of reinforcement arranged in different manners. The results lead to a warning against the excessive reductions in the density of the reinforcements near the edges.

RESUMEN

Seis losas cuadradas, colocadas sencillamente sobre su contorno y cuatro paneles cuadrados reforzados por nervaduras, que toman apoyo sobre sus ángulos, han sido sometidos a prueba con carga uniforme. Las losas sencillas y las losas de los paneles, de las mismas dimensiones, constaban del mismo número de armaduras, pero con una disposición diferente. Los resultados conducen a tomar las precauciones que se imponen contra las disminuciones excesivas de la densidad de las armaduras hacia los bordes.

Les thèses et la méthode d'exposition adoptées par les auteurs peuvent parfois heurter certains points de vue habituellement admis. Mais il doit être compris que ces thèses, à l'égard desquelles l'Institut Technique ne saurait prendre parti, ne visent en rien les personnes ni le principe des Institutions.

1970 by *S. D. T. B. T. P.*

INFLUENCE DE LA DISTRIBUTION DES ARMATURES DANS LES DALLES CARRÉES EN BÉTON ARMÉ

par J. R. ROBINSON et Cherif MÉROUANI

Le présent article reprend sous une forme condensée la thèse soutenue avec succès le 22 juin 1967 par Chérif MEROUANI *devant la Faculté des Sciences de l'Université de Paris en vue de l'obtention du grade de Docteur-Ingénieur.*

INTRODUCTION

Ne peut-on « éclaircir » près du contour d'appui les armatures « en travée » d'une dalle en béton armé soumise à l'action de charges réparties? Il est en effet habituel, lorsqu'on emploie des aciers en barres, d'armer uniformément les plaques rectangulaires posées sur leur contour. Lorsqu'on les calcule dans l'hypothèse de l'élasticité on détermine les armatures qui sont nécessaires en leur centre pour équilibrer les moments qui s'y développent et l'on dispose la même densité superficielle d'armatures sur toute l'étendue de la plaque. Cependant si une telle dalle est posée sur un contour indéformable les moments s'exerçant près des bords parallèlement à eux ne peuvent être que faibles. Il semble qu'on puisse y supprimer des armatures parallèles à ces bords ou y arrêter des armatures normales sans modifier sensiblement le comportement en service. Toutefois en agissant ainsi on diminue la charge susceptible de provoquer la formation d'un mécanisme d'écoulement par flexion dans la même dalle et, par conséquent, on diminue sa charge admissible en service, si l'on se réfère au calcul aux états-limites.

Dans le cas de dalles carrées armées également dans les deux sens de barres continues ancrées au-delà du contour indéformable d'appui la charge d'écoulement ne dépend pratiquement que du nombre des barres dans chaque nappe et non de leur distribution dans ces nappes. Sans changer alors le nombre de barres ne peut-on envisager de les concentrer plus ou moins vers le centre? Sans diminuer la sécurité, ne peut-on escompter un gain de cette disposition sur les flèches et la fissuration? Et cela n'est-il pas possible également pour les dalles solidaires d'un contour déformable de poutres porteuses?

Les dispositions que comporte à cet égard le règlement britannique [Réf 1] ne semblent pas avoir de support expérimental et les essais disponibles [Réf 2] répondent mal à ces questions. C'est pourquoi les essais dont on va lire le compte rendu ont été entrepris. Ils ont porté sur des dalles carrées, articulées sur un contour indéformable, dites dalles simples, et sur des dalles carrées nervurées le long de leurs bords et posées sur leurs angles, dites panneaux nervurés. Dalles simples et panneaux nervurés ont été uniformément chargés au moyen de vessies de caoutchouc.

LES CORPS D'ÉPREUVE ET LEURS CONDITIONS D'ESSAIS

Formes et dispositifs d'essai

Les dalles simples mesuraient 285 × 285 × 10 cm et étaient traversées de quatre fourreaux d'ancrage disposés aux angles d'un carré concentrique de 250 cm de côté (fig. 1). Les panneaux nervurés étaient formés d'une dalle de mêmes dimensions que les précédentes et de quatre nervures de 12 cm de largeur et de 23 cm de saillie sous dalles, dont les axes formaient un carré de 250 cm de côté, concentrique à la dalle. Quatre fourreaux d'ancrage étaient disposés aux angles de ce dernier carré (fig. 2).

Dalles simples et panneaux nervurés ont été essayés « à l'envers », c'est-à-dire chargés de bas en haut, la vessie de caoutchouc de chargement étant disposée entre la plateforme d'essais de l'IRABA et le corps d'épreuve, et maintenue latéralement par une garniture métallique carrée de 250 cm de côté. Une dalle simple prenait appui sur un cadre très rigide, ancré à la plateforme, par l'intermédiaire de boudins de pâte de ciment alumineux durcie contenue dans des tubes de polyvinyle de 25 mm, disposés suivant un carré concentrique à la dalle de 250 cm

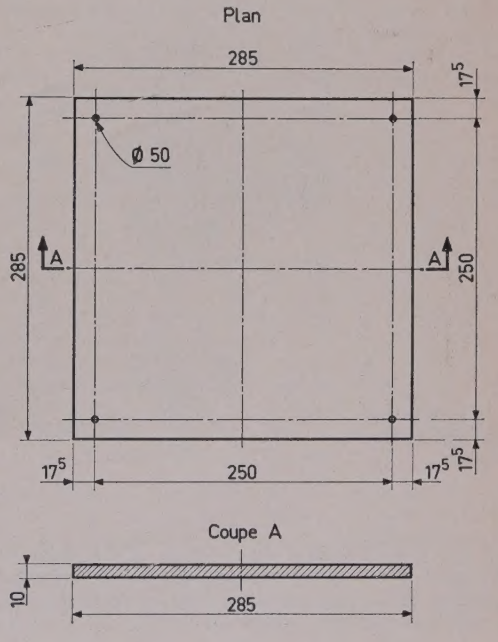

FIG. 1. — **Coffrage des dalles simples.**

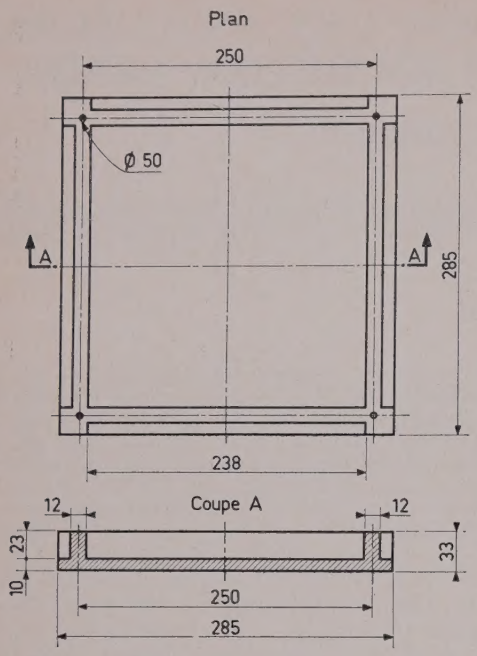

Fig. 2. — Coffrage des panneaux nervurés.

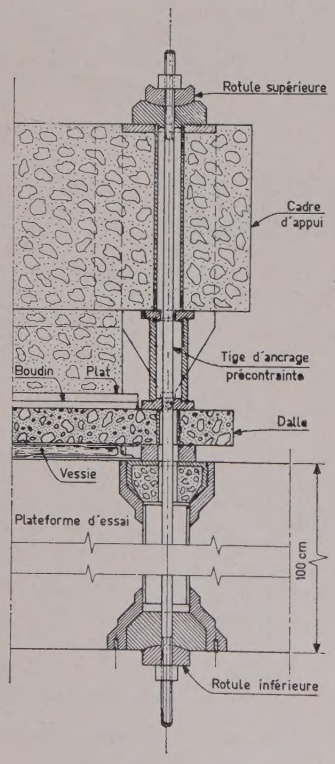

Fig. 3. — Schéma d'ancrage des dalles simples.

de côté. Le soulèvement des angles de la dalle hors du plan d'appui était prévenu par le dispositif représenté sur la figure 3. Le dispositif d'essai a déjà été décrit en détails par l'un de nous (Réf 3).

Les panneaux nervurés étaient ancrés à la plateforme par des câbles de précontrainte de 12 fils de 5 mm dont la souplesse permettait les rotations de leurs angles. La garniture métallique contenant la vessie était extensible en hauteur pour suivre la déformation des nervures.

Armatures des corps d'épreuve

Les dalles simples étaient armées sur leur face tendue (face supérieure lors de l'essai) d'une nappe en deux lits croisés identiques d'aciers Tentor de 10 mm de diamètre dont le pourcentage global (ou le volume) était le même pour toutes les dalles mais dont la disposition variait d'une dalle à l'autre.

Dans la dalle de référence uniformément armée, repérée BN 1, chaque lit de la nappe comportait 22 aciers, dont 20 actifs, à l'équidistance de 12,5 cm, à l'intérieur du contour d'appui de 250 cm de côté (fig. 4).

La dalle BN 9 était également uniformément armée de deux lits d'aciers à l'équidistance de 12,5 cm, mais disposés à 45°, parallèlement aux diagonales (fig. 5).

La dalle BN 10 comportait un carré central surarmé de 125 cm de côté (non compris les crochets d'ancrage des barres arrêtées dans l'étendue de la dalle) comme le

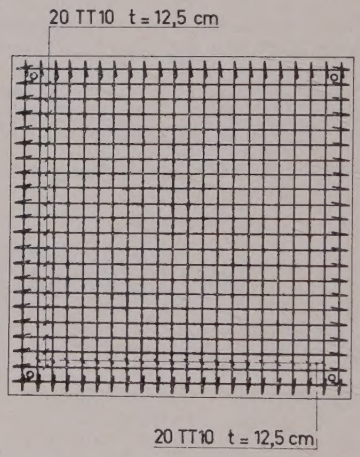

Fig. 4. — Dalle BN 1 : armatures.

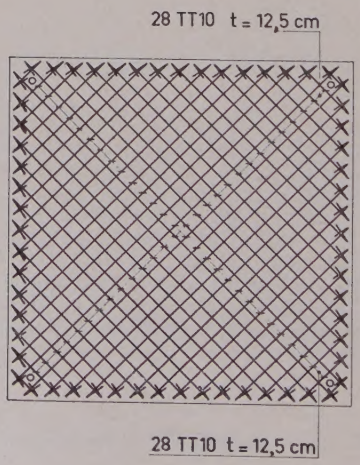

Fig. 5. — Dalle BN 9 : armatures.

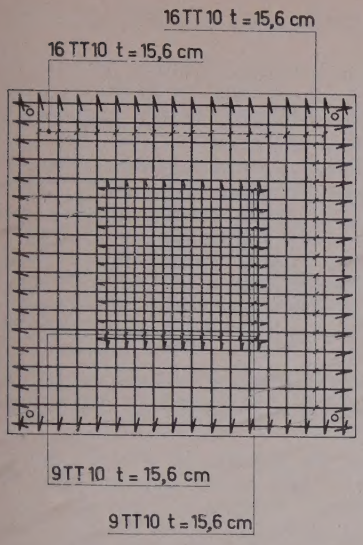

FIG. 6. — **Dalle BN 10 : armatures.**

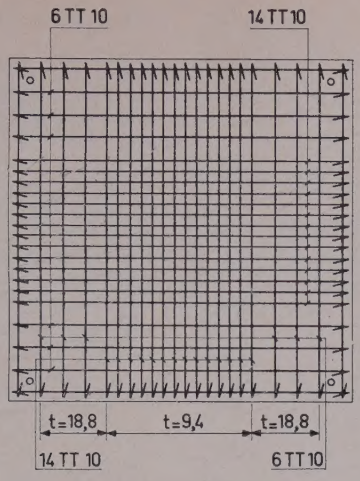

FIG. 7. — **Dalle BN 2 1/2 : armatures.**

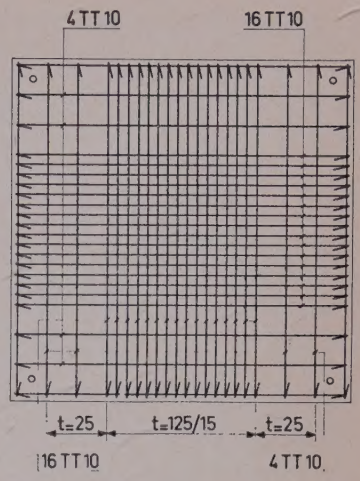

FIG. 8. — **Dalle BN 3 1/2 : armatures.**

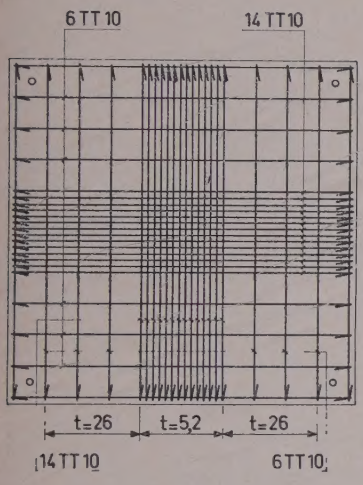

FIG. 9. — **Dalle BN 5 1/4 : armatures.**

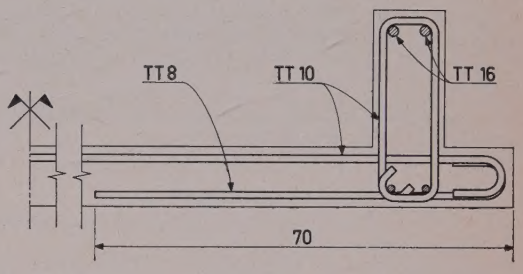

FIG. 10. — **Demi-coupe transversale d'un panneau nervuré. Les armatures de la dalle du panneau normales au plan de la figure ne sont pas représentées.**

représente la figure 6. Les 9 barres de 125 cm d'un lit du carré central avaient même volume que 4,5 barres de 250 cm. Le volume des armatures d'un lit équivalait ainsi à celui de 20,5 barres de 250 cm. Il était un peu supérieur à celui d'un lit de la dalle de référence (20 barres).

Les dalles simples suivantes sont dites armées par bandes. Leurs armatures étaient parallèles à leurs côtés et dans chaque lit étaient disposées dans une bande centrale, à une équidistance inférieure à celle de la dalle de référence et, dans deux bandes latérales symétriques, à une équidistance supérieure. Les dalles BN 2 1/2 et BN 3 1/2 comportaient des bandes centrales respectivement deux et trois fois plus denses que les bandes latérales et couvrant les demi largeurs de ces dalles (fig. 7 et 8). La dalle BN 5 1/4 comportait des bandes centrales cinq fois plus denses que les bandes latérales et d'une largeur égale au quart du côté de la dalle (fig. 9).

Toutes les dalles étaient armées localement aux angles, sur leur face chargée, d'un quadrillage d'aciers Tentor de 6 mm à l'équidistance de 6,25 cm pour les dalles BN 1 et 9 et de la moitié de l'espacement des armatures de la face tendue dans les bandes latérales pour les autres dalles. Ces armatures étaient suffisantes pour éviter aux angles des ruptures locales prématurées par poinçonnement et la formation de « bascules » de quelque importance susceptibles de réduire les charges limites d'écoulement des dalles (Réf 4 et 5).

Les dalles constitutives de trois panneaux nervurés ont été armées parallèlement à leurs côtés. Les armatures de leur face tendue se composaient dans chaque nappe de 22 aciers Tentor de 10 mm de diamètre dont 20 étaient actifs, c'est-à-dire disposés à l'intérieur des plans moyens des nervures de bordure. Aux bords de la dalle, un chapeau Tentor ⌀ 8 mm était disposé au droit de chaque armature ⌀ 10 mm de la face tendue. L'armature tendue de chaque nervure se composait de 2 aciers Tentor de 16 mm de diamètre. L'essentiel de ces dispositions est représenté figure 10. Les trois panneaux nervurés repérés BN 1 A, BN 3 1/2 A et BN 5 1/4 A présentaient respectivement dans leurs dalles les mêmes distributions d'armatures de leurs faces tendues que les dalles BN 1 (fig. 4) BN 3 1/2 (fig. 8) et BN 5 1/4 (fig. 9).

Un quatrième panneau repéré BN 9 A présentait les mêmes nervures que les précédents et dans sa dalle sur la face tendue, les mêmes armatures parallèles aux diagonales à l'équidistance de 12,5 cm que la dalle BN 9 (fig. 5); les chapeaux sur poutres de bordure étant constitués d'aciers Tentor de 8 mm à une équidistance égale à celle des armatures de la face tendue.

Caractéristiques des matériaux

Le béton était composé de granulats silico-calcaires roulés du bassin de la Seine et de ciment CPAL 325 suivant les proportions pondérales ci-après pour un mètre cube en place :

Gravillon 6,3-16 mm	1 170 kg
Sable 0- 5 mm	585 —
Ciment CPAL 325	300 —

La quantité d'eau, de 185 litres par mètre cube en place en moyenne, était réglée de façon que l'affaissement au cône du béton frais soit de 3,5 cm environ. Les dalles simples et les panneaux nervurés ont été bétonnés « à l'endroit », c'est-à-dire la face destinée à être tendue contre le coffrage. Vingt quatre heures après le bétonnage ils ont été soumis à une cure de brouillard, d'une durée de huit jours pour les dalles simples BN 1 et BN 9 et de quinze jours pour tous les autres corps d'épreuves. Trois cylindres de ⌀ 16 par 32 cm pour mesure de la résistance à la compression et trois prismes de 7 par 7 par 35 cm pour mesure de la résistance à la traction par flexion ont été moulés avec chaque corps d'épreuve, conservés dans les mêmes conditions et essayés le même jour.

Toutes les barres d'aciers utilisées ont été soumises à des essais de traction en vue de la mesure de leur limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % d'allongement permanent.

Les résultats des mesures des caractères des matériaux figurent au tableau I.

TABLEAU I

CARACTERES MECANIQUES DES MATERIAUX

REPERE du corps d'épreuve	BETONS Ages (jours)	Résistances à la compression kg/cm2	Résistances à la traction kg/cm2	ACIERS Limites d'élasticité Ø 16 kg/cm2	Ø 10 kg/cm2
BN 1	40	315	21,5		4830
BN 9	50	353	31		5050
BN 10	50	353	28,5		5100
BN 2 1/2	43	318	25,5		5120
BN 3 1/2	40	350	28		5150
BN 5 1/4	43	335	28		5130
BN 1 A	37	324	27,5	5190	5070
BN 9 A	41	307	27	5090	5260
BN 3 1/2 A	49	326	30,2	5050	4960
BN 5 1/4 A	40	326	27,8	5240	4980

Charges de service et charges d'écoulement

Pour la bonne intelligence de ce qui va suivre il importe d'avoir présentes à l'esprit les charges de service et les charges d'écoulement des différents corps d'épreuve. On trouvera le calcul de ces charges en annexe.

Le calcul des charges de service effectué dans l'hypothèse de l'élasticité et conformément aux Règles CC BA 68 est sans ambiguïté pour les dalles uniformément armées. Pour les autres, nous appelons « charge de service espérée » celle qui développe au centre d'une dalle simple les moments qui y sont admissibles à raison du pourcentage d'armature qui y est réalisé, ou celle qui développe dans les nervures d'un panneau les moments qui y sont admissibles.

Le calcul des charges d'écoulement est effectué suivant la théorie des lignes charnières, aujourd'hui classique (Réf. 2 et 3).

Les valeurs des charges de service et d'écoulement figurent aux tableaux II et III. Il est évident que le calcul de la charge de service espérée n'a pas de sens pour la dalle simple 5 1 /4 eu égard à la valeur de la charge d'écoulement.

TABLEAU II

CHARGES DE SERVICE ESPEREES (t /m2)

Dalles simples					Panneaux nervurés		
1 et 9	10	2 1/2	3 1/2	5 1/4	1 A, 9 A	3 1/2 A	5 1/4 A
4,4	6,8	5,7	6,4	9,6	4,4	5,2	5,2

TABLEAU III

CHARGES D'ECOULEMENT (t/m2)

Dalles simples					Panneaux nervurés			
1	9	10	2 1/2	3 1/2	5 1/4	1 A	9 A	3 1/2 A	5 1/4 A
8,4	8,8	9,1	8,9	9,0	8,9	9,0	9,2	8,8	9,0

OBSERVATIONS ET MESURES FAITES AUX ESSAIS

Application des charges

Les pressions de l'eau dans la vessie de chargement ont été mesurées au moyen d'un manomètre à colonne d'eau jusqu'à 1,50 m et d'un manomètre à colonne de mercure au-delà. Les zéros des graduations correspondaient aux hauteurs piézométriques qui équilibraient les poids des corps d'épreuve. Les charges ont été appliquées par paliers de hauteur croissante avec retour à zéro à chaque palier, à raison de 15 à 16 cycles jusqu'à charge ultime pour les dalles simples et 13 à 14 pour les panneaux. A chaque application de charge cette dernière a été maintenue constante jusqu'à stabilisation (quelques minutes), pour éviter la chute de pression qui se produit si les vannes sont fermées dès la charge atteinte.

Comportement apparent des dalles simples

Pour toutes les dalles simples, les premières fissures sont apparues sur les diagonales, plus près des angles que du centre. Puis les fissures se sont développées suivant des faisceaux de lignes parallèles aux diagonales dans les régions des angles, et suivant des réseaux maillés tendant à reproduire le tracé des aciers dans les régions centrales. Sous charges ultimes, les larges fissures qui marquent la position des lignes charnières se sont manifestées près des angles suivant les diagonales. Elles se sont ramifiées suivant diverses fissures du réseau maillé dans les régions centrales des dalles de référence BN 1 et 9. Elles se sont arrêtées aux points d'intersection des bords des bandes centrales d'armatures dans les dalles BN 2 1/2, 3 1/2 et 5 1/4. Elles ont rejoint les coins d'un carré de lignes charnières dessinant les bords du carré central surarmé dans la dalle BN 10 (cf. photographies, fig. 11 à 22).

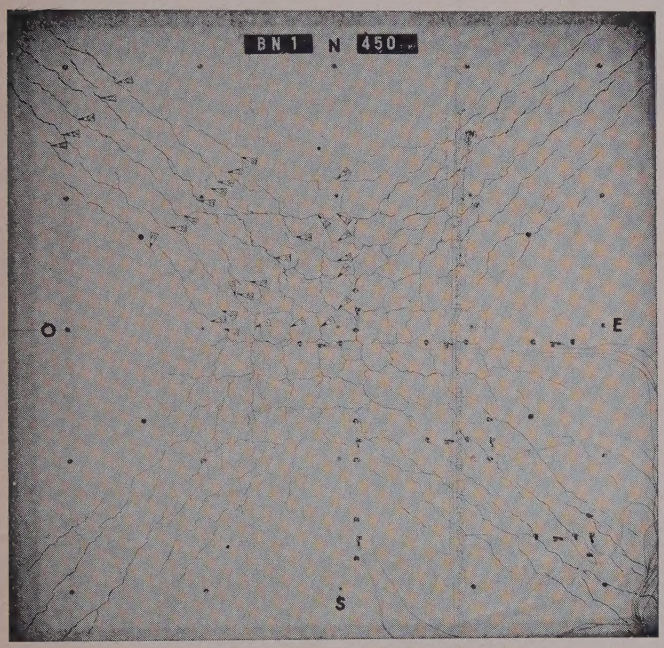

FIG. 11. — **La dalle simple BN 1 sous la charge de 4,50 t/m².**

Après essai, les dalles retournées ont toutes laissé voir sur leur face chargée une fissure circulaire tangente au contour d'appui. La dalle BN 1 montrait en outre des fissures de traction dans sa zone centrale. Ces fissures sont caractéristiques d'un état d'équilibre de membrane de traction développé jusqu'à la charge ultime : la partie de la dalle intérieure à la fissure circulaire se comporte comme une plaque appuyée sur un cercle de contour. Sa zone centrale se déforme comme une membrane tendue, les efforts radiaux de traction étant équilibrés par un anneau de compression circonférentielle développé le long et à l'intérieur du contour (cf. photographies; fig. 23 à 27).

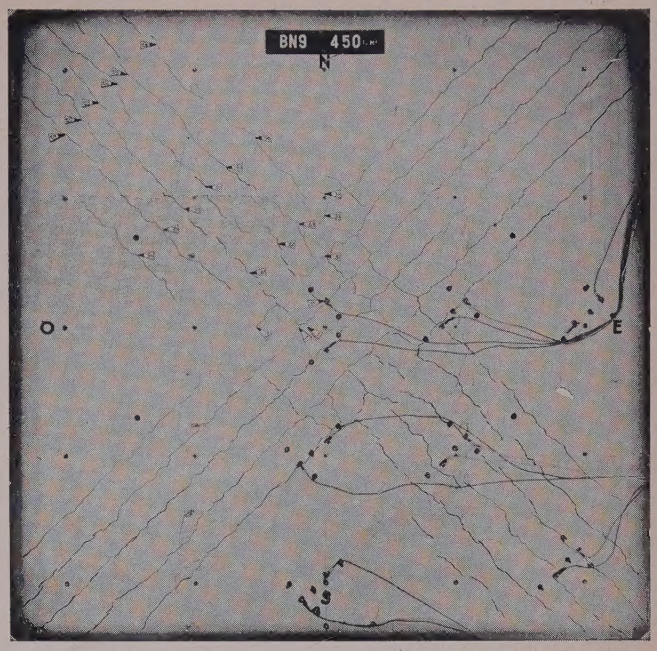

FIG. 12. — **La dalle simple BN 9 sous la charge de 4,50 t/m².**

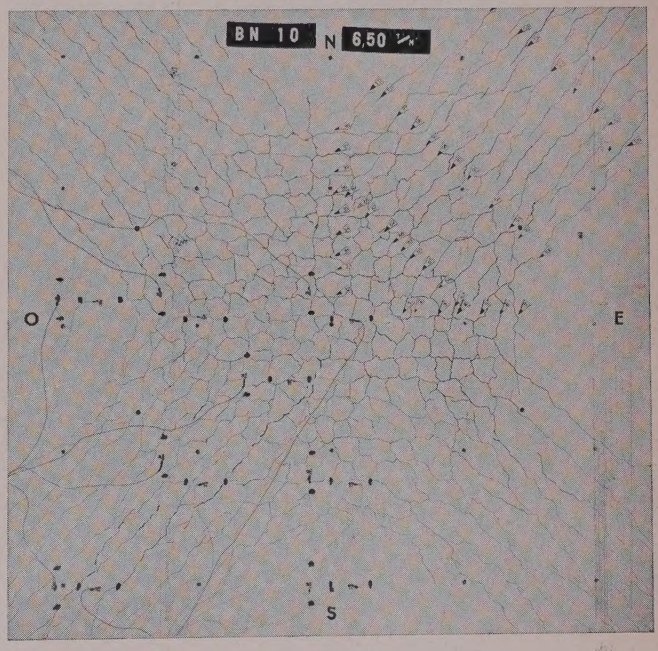

FIG. 13. — **La dalle simple BN 10 sous la charge de 6,50 t/m².**

FIG. 14. — La dalle simple BN 2 1/2 sous la charge des 5,50 t/m².

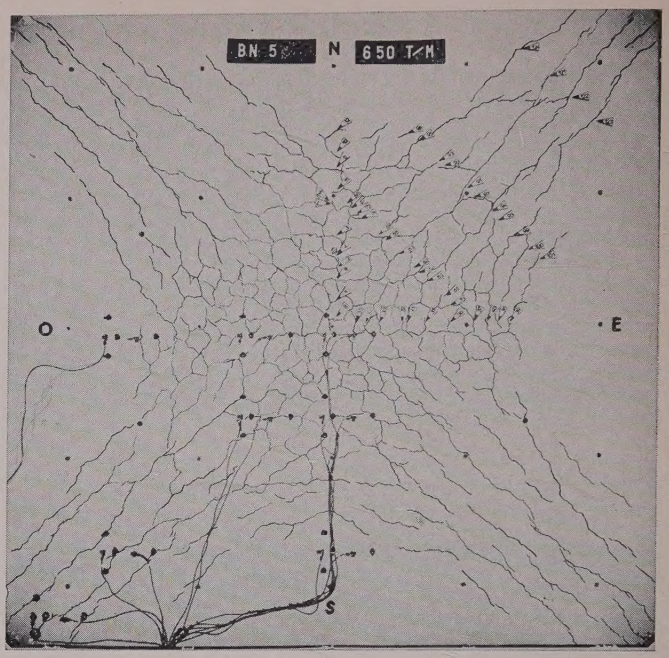

FIG. 16. — La dalle simple BN 5 1/2 sous la charge de 6,50 t/m².

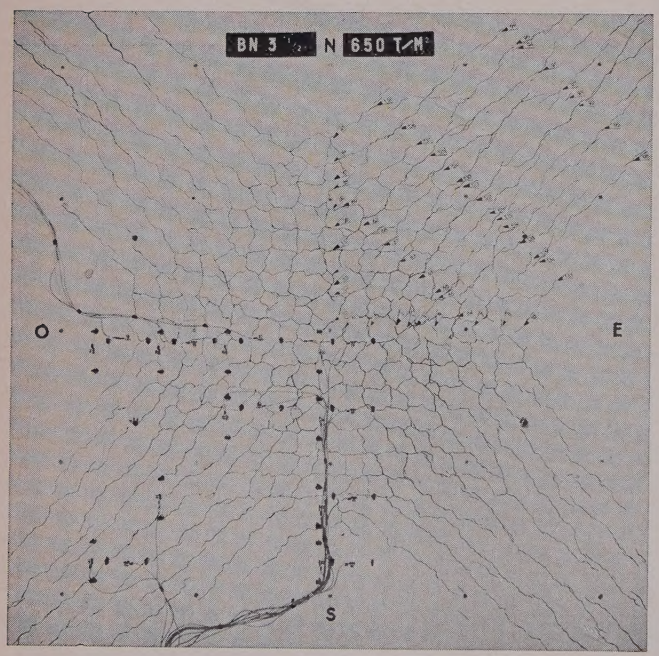

FIG. 15. — La dalle simple BN 3 1/2 sous la charge de 6,50 t/m².

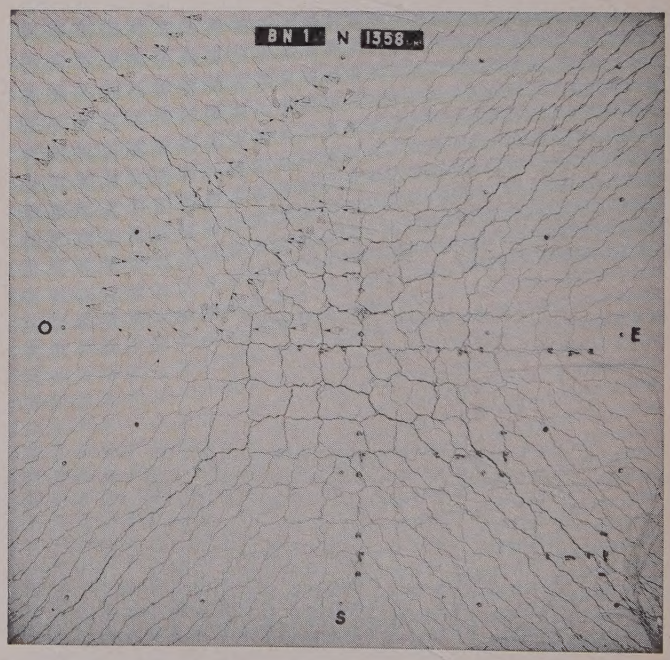

FIG. 17. — La dalle simple BN 1 sous la charge ultime de 13,58 t/m².

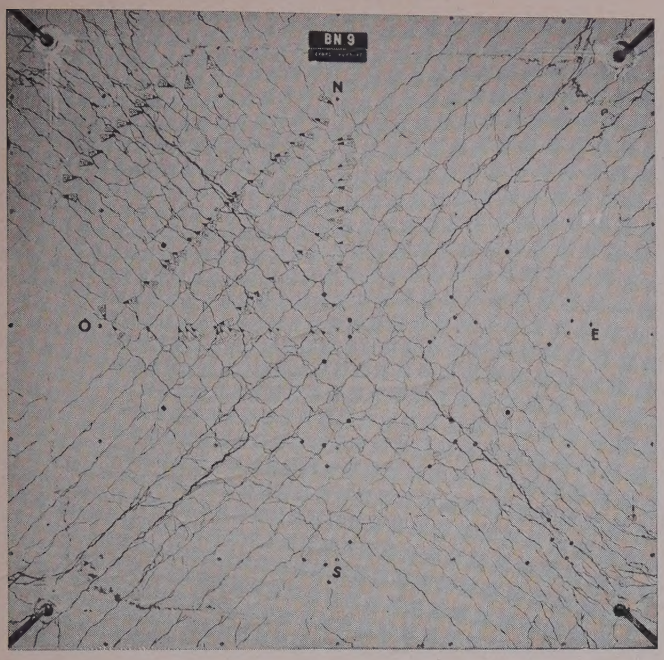

FIG. 18. — **La dalle simple BN 9 sous la charge ultime de 13,32 t/m².**

FIG. 19. — **La dalle simple BN 10 sous la charge ultime de 12,12 t/m².**

FIG. 20. — **La dalle simple BN 2 1/2 sous la charge ultime de 13,80 t/m².**

FIG. 21. — **La dalle simple BN 3 1/2 sous la charge ultime de 13,95 t/m².**

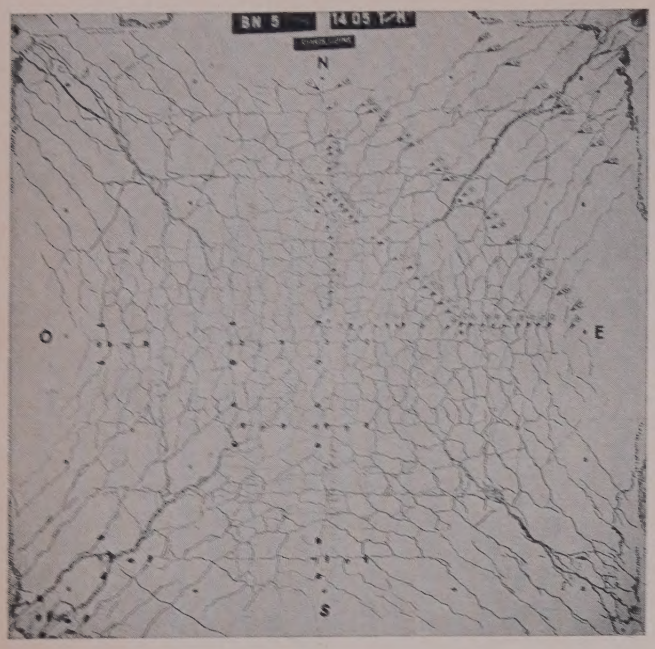

FIG. 22. — La dalle simple BN 5 1/2 sous la charge ultime de 14,05 t/m².

FIG. 24. — La face chargée de la dalle simple BN 9 après l'essai.

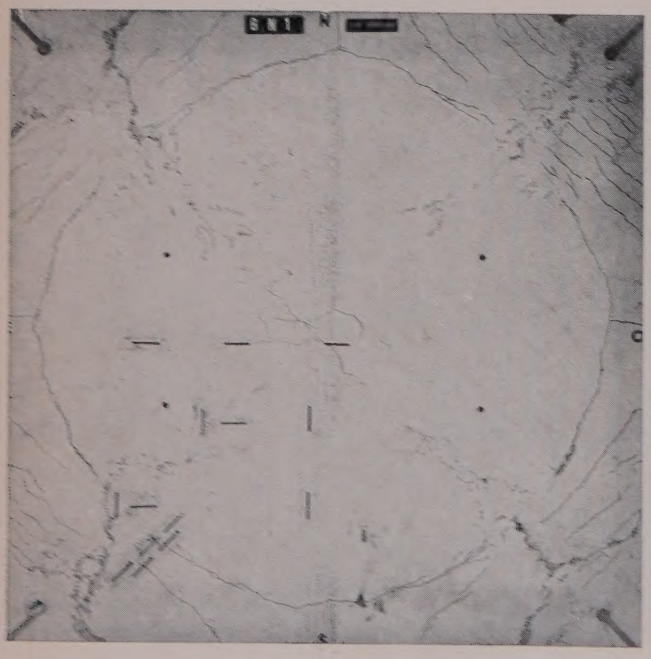

FIG. 23. — La face chargée de la dalle simple BN 1 après l'essai.

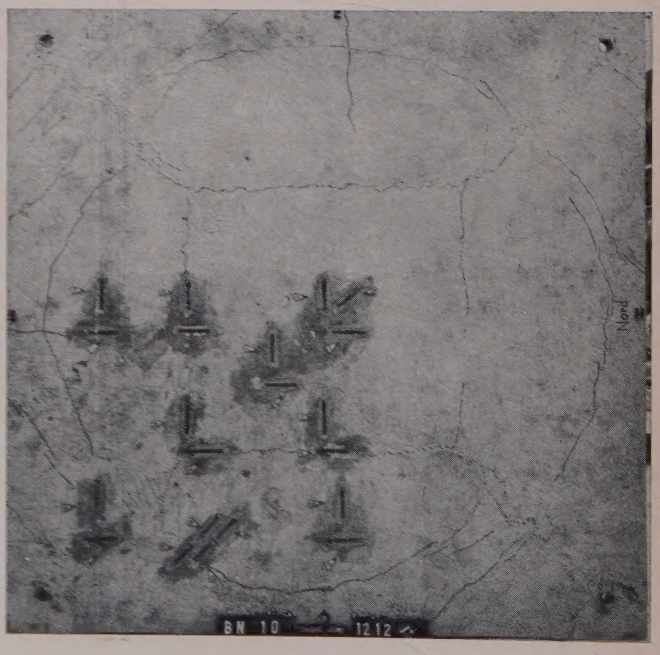

FIG. 25. — La face chargée de la dalle simple BN 10 après l'essai.

FIG. 26. — **La face chargée de la dalle simple BN 3 1/2 après l'essai.**

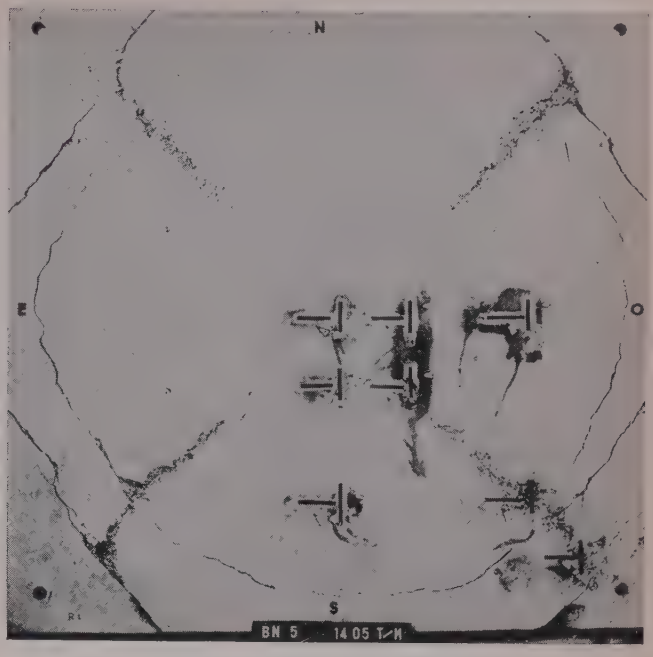

FIG. 27. — **La face chargée de la dalle simple BN 5 1/2 après l'essai.**

Comportement apparent des panneaux nervurés

Dans les panneaux, les poutres se fissurent d'abord à la flexion vers leurs milieux. Puis la fissuration des dalles se produit à son tour, débutant dans la région centrale, et évolue ensuite en affectant des allures analogues à celles qu'elle revêt dans les dalles simples; tout au plus a-t-elle tendance à se développer plus tôt dans les régions centrales que le long des diagonales. Sous charge ultime il ne s'ouvre dans chaque panneau qu'une ligne charnière, suivant une médiane. Si la dalle du panneau est armée parallèlement aux côtés, c'est le cas pour les panneaux BN 1 A, 3 1/2 A et 5 1/4 A, la ligne charnière se développe normalement aux armatures les moins proches de la face tendue de la dalle; c'est-à-dire que des deux lignes charnières possibles, celle qui se produit effectivement est celle suivant laquelle la dalle du panneau présente la moindre résistance. Les lignes charnières sont surtout marquées au-dessus et à proximité des poutres; elles le sont beaucoup moins ou pas du tout dans la région centrale des dalles. Il en est de même sur les faces chargées des panneaux examinées après l'essai où les lignes charnières sont marquées par des bandes de béton écrasé. D'autre part, sur ces dernières faces n'apparaît aucune trace d'équilibre de membrane (cf. photographies; fig. 28 à 36).

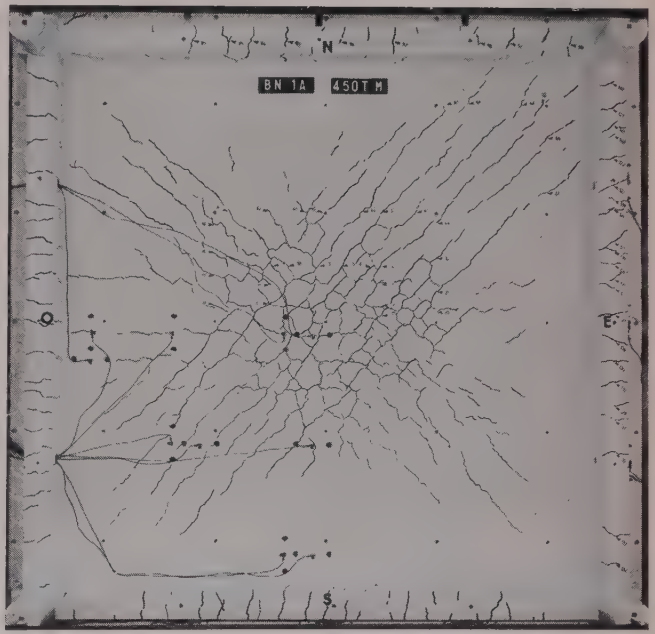

FIG. 28. — **Le panneau nervuré BN 1 A sous la charge de 4,50 t/m².**

FIG. 29. — Le panneau nervuré BN 9 A sous la charge de 4,50 t/m².

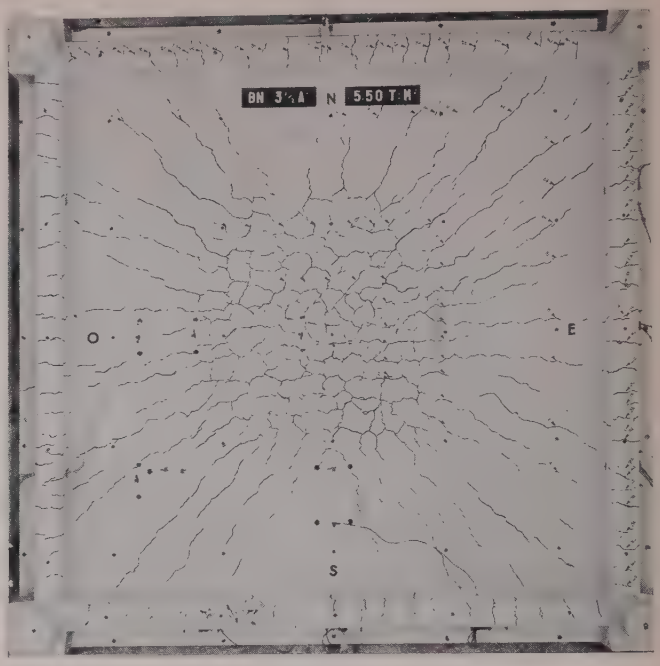

FIG. 30. — Le panneau nervuré BN 3 1/2 A sous la charge de 5,50 t/m².

FIG. 31. — Le panneau nervuré BN 5 1/2 A sous la charge de 5,50 t/m².

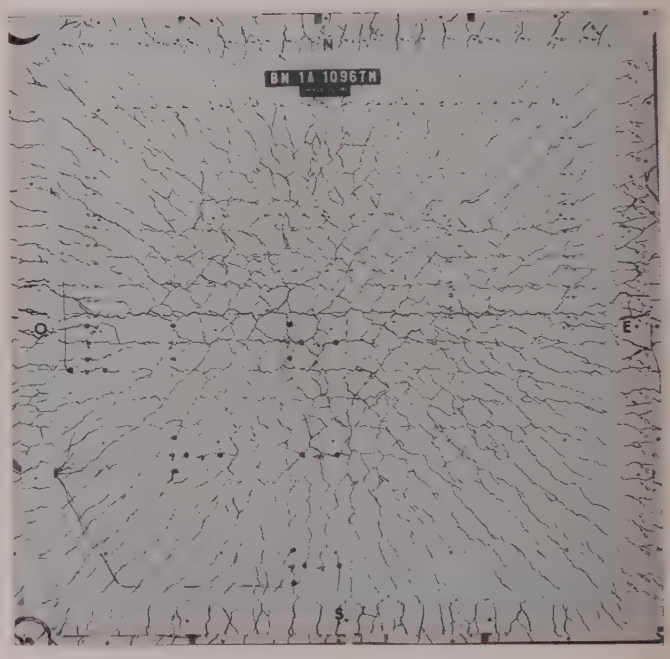

FIG. 32. — Le panneau nervuré BN 1 A sous la charge ultime de 10,96 t/m².

FIG. 33. — **Le panneau nervuré BN 9 A sous la charge ultime de 10,55 t/m².**

FIG. 34. — **Le panneau nervuré BN 3 1/2 A sous la charge ultime de 10,25 t/m².**

FIG. 35. — **Le panneau nervuré BN 5 1/4 A sous la charge ultime de 10,99 t/m².**

FIG. 36. — **La face chargée du panneau nervuré BN 5 1/4 après l'essai.**

Charges ultimes

Les charges ultimes mesurées sont indiquées au tableau IV ainsi que leurs rapports avec les charges sur lesquelles peut porter l'intérêt.

Il n'y a pas de différences significatives entre les charges ultimes des dalles simples, réserve faite de la dalle BN 10 à carré central surarmé. Il n'y a pas non plus de différences significatives entre les charges ultimes des différents panneaux. Au point de vue de la charge ultime, toutes les dispositions d'armatures dans les dalles sont donc équivalentes lorsque toutes les armatures sont ancrées au-delà du contour d'appui; seule fait exception à cet égard la dalle simple BN 10 dont la charge ultime est de 10 % inférieure à celles des autres dalles.

TABLEAU IV

CHARGES ULTIMES *

		P_u (t/m2)	$\frac{P_u}{P_{u1}}$	$\frac{P_u}{P_{uA1}}$	$\frac{P_u}{P_{ec}}$	$\frac{P_u}{P_{se}}$	$\frac{P_u}{P_{s1}}$
Dalles simples	BN 1	13,58	1	"	1,61	3,1	3,1
	BN 9	13,32	0,98	"	1,51	3,0	3,0
	BN 10	12,12	0,89	"	1,33	2,1	2,8
	BN 2 1/2	13,80	1,02	"	1,55	2,4	3,1
	BN 3 1/2	13,95	1,03	"	1,55	2,2	3,2
	BN 5 1/4	14,05	1,03	"	1,58	1,5	3,2
Panneaux	BN 1 A	10,96	"	1	1,22	2,5	2,5
	BN 9 A	10,55	"	0,96	1,15	2,4	2,4
	BN 3 1/2 A	10,25	"	0,94	1,16	2,0	2,3
	BN 5 1/4 A	10,99	"	1,00	1,22	2,1	2,5

* Légende :

P_u : charge ultime mesurée d'un corps d'épreuve

P_{u1} : charge ultime de la dalle de référence BN 1

P_{uA1} : charge ultime du panneau de référence BN A 1

P_{ec} : charge d'écoulement théorique

P_{se} : charge de service espérée

P_{s1} : charge de service espérée (et règlementaire) de BN 1 et BN A1.

L'effet de membrane est extrêmement important pour les dalles simples dont la charge ultime surpasse de plus de 50 % la charge théorique d'écoulement. Il n'y a d'exception que pour la dalle BN 10 pour laquelle l'effet de membrane dépasse tout de même 30 %. Il semble que le fait qu'une partie des armatures de la région centrale de cette dernière dalle ne soient pas ancrées au-delà du contour d'appui explique la réduction relative de l'effet de membrane et par là même la réduction relative de la charge ultime.

Le fait que les charges ultimes des panneaux soient de 15 à 20 % supérieures à leurs charges théoriques d'écoulement, dû partiellement sans doute au raffermissement de l'acier, partiellement aussi à l'effet favorable sur la résistance à la flexion des dalles de ce que ces dalles constituent les membrures comprimées des poutres, pourrait peut-être pour le surplus s'expliquer par ce qu'il se développe aussi dans ces panneaux un effet de membrane sensible. Il n'en apparaît pas de traces sur les faces chargées, mais les fissures normales aux diagonales de la dalle aux quarts Nord de ces dernières dans le panneau BN 3 1/2 A sous charge ultime (fig. 34) paraissent dues à des efforts de traction plus qu'à des flexions.

Plastification des aciers

On voit sur les dalles des corps d'épreuve (cf. photographies) des groupes de trois taches noires alignées. Dans chaque groupe les taches extrêmes, à peu près circulaires et bien marquées, sont les images des plots d'attache d'une corde métallique sur une barre d'armature. La tache centrale, moins distincte, est l'image des électro-aimants qui permettent d'exciter la vibration de la corde et d'en mesurer la fréquence. De cette dernière on déduit l'allongement de l'acier. On peut remarquer que, sur les dalles, simples ou nervurées, des cordes ont été placées là où l'on attendait les plus grandes déformations. D'autres cordes ont été placées sur les armatures des poutres des panneaux.

Il a été possible de noter la charge à laquelle a été atteinte la limite d'élasticité de l'acier dans l'armature la plus sollicitée, charge que nous appellerons charge de première plastification pour simplifier le langage (le mot est un peu impropre pour des aciers écrouis). La première plastification est apparue au centre dans les dalles simples, sauf dans la dalle BN 10 où elle a eu lieu aux angles du carré central. Pour les panneaux, la première plastification apparaît dans leurs poutres en leur milieu; la première plastification de leurs dalles apparaît ensuite. Le tableau V indique les charges de première plastification ainsi que leurs rapports avec les charges ultimes, d'écoulement et de service. Le tableau VI donne les charges de première plastification des dalles proprement dites des panneaux ainsi que leurs rapports avec les charges ultimes et d'écoulement.

TABLEAU V

CHARGES DE PREMIERE PLASTIFICATION *

		P_p (t/m2)	$\frac{P_p}{P_u}$	$\frac{P_p}{P_{ec}}$	$\frac{P_p}{P_{se}}$	$\frac{P_p}{P_{s1}}$
Dalles simples	BN 1	9,2	0,68	1,10	2,1	2,1
	BN 9	9,7	0,73	1,10	2,2	2,2
	BN 10	9,4	0,78	1,03	1,4	2,1
	BN 2 1/2	9,5	0,69	1,07	1,7	2,2
	BN 3 1/2	10,65	0,76	1,18	1,7	2,4
	BN 5 1/4	11,6	0,83	1,30	1,2	2,6
Panneaux	BN 1 A	8,15	0,74	0,91	1,9	1,9
	BN 9 A	7,75	0,73	0,84	1,8	1,8
	BN 3 1/2 A	7,90	0,77	0,90	1,5	1,8
	BN 5 1/4 A	8,15	0,74	0,91	1,6	1,9

* Légende :

P_p : charge de première plastification ;

autres symboles : se reporter au tableau IV.

Les cordes vibrantes posées sur les dalles simples ont permis de suivre le long d'une demi diagonale la progression de la plastification des aciers sous charge croissante. Cette progression est représentée à la figure 37 pour les différentes dalles. Les deux dalles à répartition uniforme d'armatures BN 1 et BN 9 s'opposent nettement : dans la dalle BN 1, armée parallèlement à ses côtés, la plastification s'étend du centre vers l'angle, tandis que dans la dalle BN 9, armée parallèlement à ses diagonales, la

TABLEAU VI

PREMIERE PLASTIFICATION DES DALLES DES PANNEAUX *

BN :	1 A	9 A	3 1/2 A	5 1/4 A
P_{pd} (t/m2)	9,50	8,95	9,60	10,45
P_{pd}/P_u	0,87	0,85	0,94	0,95
P_{pd}/P_{ec}	1,06	0,97	1,09	1,16

* Légende :

P_{pd} : charge de première plastification des dalles des panneaux

autres symboles : se reporter au tableau IV.

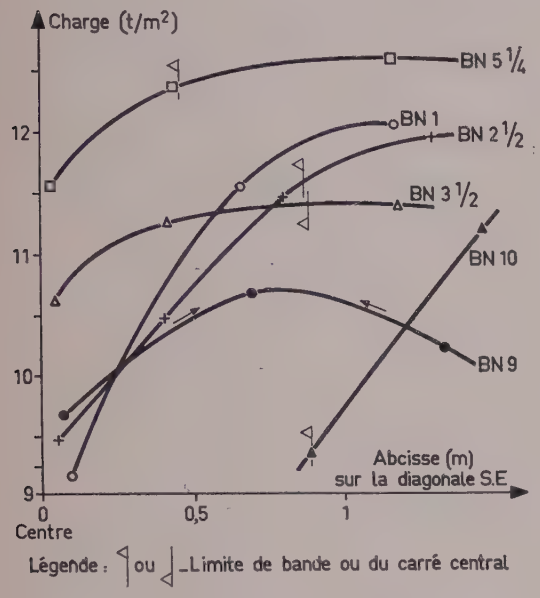

FIG. 37. — **Progression de la plastification des aciers dalles simples.**

plastification apparue d'abord au centre, puis dans l'angle, progresse à partir de ces deux points. La dalle armée par bandes BN 2 1/2 qui ne présente qu'une concentration modérée d'armatures en son centre se comporte comme la dalle BN 1 uniformément armée. Dans les dalles armées par bandes BN 3 1/2 et BN 5 1/4, à forte concentration d'armatures en leurs centres, l'apparition plus tardive de la plastification est compensée par une progression beaucoup plus rapide. La dalle BN 10 à carré central surarmé se distingue nettement des autres dalles; aucune armature ne se plastifie à l'intérieur du carré central.

La progression de la plastification des aciers des dalles des panneaux nervurés a également pu être suivie le long d'une demi médiane. Elle est représentée à la figure 38. La plastification apparaît au centre des dalles et progresse vers le bord sauf pour la dalle du panneau BN 5 1/4 A dans laquelle elle s'étend à la totalité de la dalle sous charge pratiquement constante. Pour tous ces panneaux la charge ultime est de très peu supérieure à la charge de complète plastification.

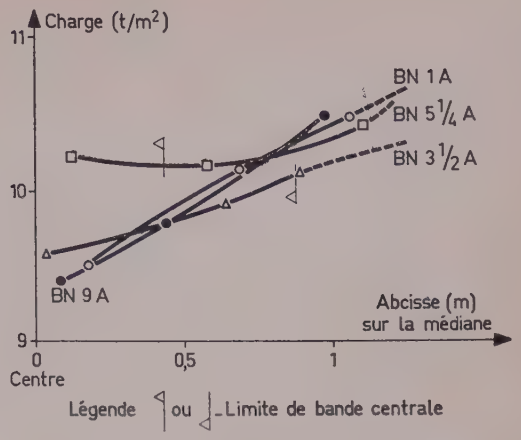

FIG. 38. — **Progression de la plastification des dalles des panneaux nervurés.**

Flèches

Les flèches ont été mesurées à l'aide d'un niveau optique WILD N 3 de haute précision et d'une mire en invar qui prenait appui par une bille d'acier sur des cupules coniques en laiton collées sur les corps d'épreuve. Des corrections ont été faites pour tenir compte des soulèvements des appuis qui ne sont sensibles que sous charges élevées pour les dalles simples et qui ont toujours été très voisins aux quatre angles.

Les diagrammes des flèches au centre des corps d'épreuve en fonction de la charge font l'objet de la figure 39 pour les dalles simples et de la figure 40 pour les panneaux nervurés. Il y a une grande similitude de comportement entre les différentes dalles simples d'une part et les différents panneaux nervurés d'autre part : aucune singularité significative ne se manifeste.

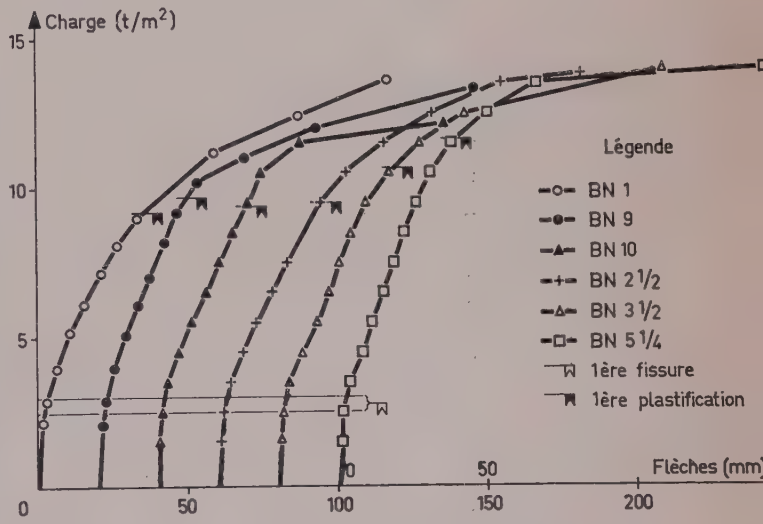

FIG. 39. — **Flèches au centre des dalles simples.**

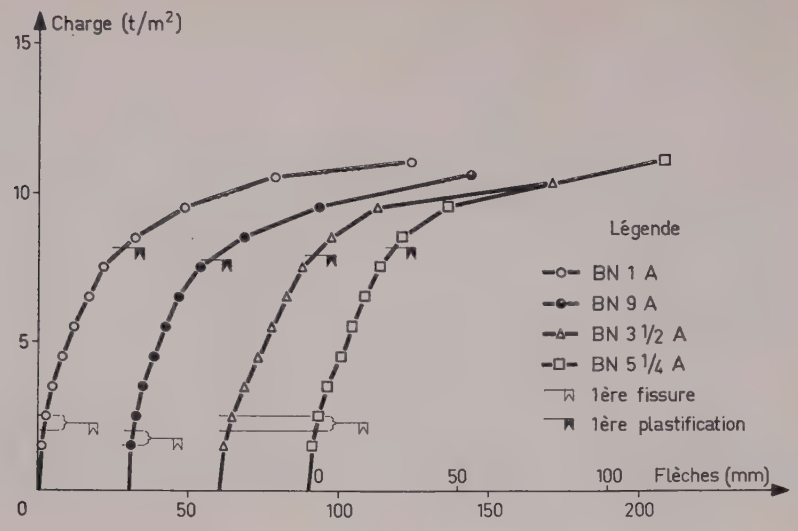

FIG. 40. — **Flèches au centre des panneaux.**

Le tableau VII donne les valeurs mesurées des flèches au centre des dalles et panneaux sous différentes charges. Sous la charge de 2 t /m² les corps d'épreuve peuvent être jugés se comporter élastiquement, la fissuration n'ayant pas commencé; les légères différences qui se manifestent entre eux (BN 3 1 /2 A excepté) ne semblent devoir être attribuées qu'à la dispersion expérimentale, le calcul indiquant que les variations du pourcentage d'armatures affectent peu les rigidités. Sous la charge P_{s1} (de 4,4 t /m²), charge réglementaire de service pour les corps d'épreuve BN 1, 9, 1A et 9A, la moyenne des flèches des dalles simples est de 7,75 mm; la flèche la plus grande, celle de la dalle BN 2 1 /2 n'en diffère que de moins de 0,6 mm, écart que l'on doit attribuer à la dispersion eu égard à sa valeur modérée d'abord et à ce qu'il n'est pas rationnellement explicable ensuite; en revanche l'écart de la flèche la plus petite, celle de la dalle BN 10 bien qu'encore relativement petit, 1,15 mm, paraît pouvoir être attribué à l'influence du carré central surarmé de cette dalle. Nous ne pouvons par ailleurs expliquer l'anomalie des flèches particulièrement élevées que présente le panneau nervuré BN 3 1 /2 A sous les charges : 2 t /m², P_{se} et P_{s1}. Cependant il semble que les panneaux dont les dalles sont armées par bandes (3 1 /2 A et 5 1 /4 A) accusent des flèches plus importantes que les panneaux à dalles uniformément armées (1 A et 9 A); il y a une raison à cela : la concentration des aciers en bandes tendrait à charger davantage les poutres en leurs milieux. Enfin les valeurs des flèches sous les charges de service dites espérées suffit à montrer le caractère excessif de ces dernières et la non convenance de leur calcul pour tous les corps d'épreuve dont les dalles ne sont pas uniformément armées (tous sauf 1 et 9, 1 A et 9 A).

TABLEAU VII

FLECHES AU CENTRE (EN MILLIMETRES)

SOUS DIFFERENTES CHARGES * (EN TONNES PAR METRE CARRE)

		2	P_{se}	P_{s1}	P_{ec}	P_u
Dalles simples	BN 1	1,5	7,8	7,8	29	117
	BN 9	1,3	7,1	7,1	25	127
	BN 10	1,0	14,3	6,6	28	96
	BN 2 1/2	1,2	14,6	8,3	31	125
	BN 3 1/2	1,5	17,1	7,8	34	130
	BN 5 1/4	1,5	27,4	7,9	24	144
Panneaux	BN 1 A	1,6	7,5	7,5	40	124
	BN 9 A	1,4	7,9	7,9	56	114
	BN 3 1/2 A	3,4	16,3	12,6	42	111
	BN 5 1/4 A	2,1	13,1	9,8	39	118

* Légende : se reporter au tableau IV

TABLEAU VIII

FLECHES RESIDUELLES AU CENTRE (EN MILLIMETRES)

APRES ACTION DE DIFFERENTES CHARGES * (EN TONNES PAR METRE CA

		2	P_{se}	P_{s1}	P_{ec}
Dalles simples	BN 1	0,37	2,6	2,6	7,3
	BN 9	0,28	1,9	1,9	5,7
	BN 10	"	3,8	1,6	6,0
	BN 2 1/2	0,20	3,6	2,3	7,8
	BN 3 1/2	0,12	3,7	1,6	9,1
	BN 5 1/4	0,25	5,8	2,2	5,1
Panneaux	BN 1 A	0,19	1,5	1,5	13,6
	BN 9 A	0,26	1,8	1,8	27,6
	BN 3 1/2 A	1,03	4,1	3,4	15,7
	B 5 1/4 A	0,38	3,2	2,7	13,7

* Légende : se reporter au tableau IV.

Fissuration

La recherche des premières fissures ne pouvant se faire qu'à la loupe et donc aux paliers de charge, leurs charges d'apparition ne sont ainsi connues qu'à l'intervalle près de deux paliers, soit 0,5 t /m² pour les basses charges. Ces charges ont été les suivantes :

— pour toutes les dalles simples : entre 2,50 et 3,00 t/m²;

— pour les poutres des panneaux nervurés : entre 1,50 et 2,00 t/m² dans le panneau BN 9 A, et entre 2,00 et 2,50 t/m² dans les autres;

— pour les dalles des panneaux nervurés : entre 2,50 et 3,00 t/m² dans le panneau BN 1 A et entre 2,00 et 2,50 t/m² dans les autres.

Les largeurs des fissures ont été mesurées à chaque palier de charge à leur intersection avec des lignes dites lignes de base tracées à l'avance, et non en des emplacements pris au hasard, afin d'éviter la sélection inconsciente par l'opérateur des points où la largeur est maximale. Ces mesures ont été effectuées au micromètre optique, sauf pour les grandes ouvertures près de la rupture où l'on s'est servi d'un fissuromètre. Les figures 41, 42 et 43 indiquent le tracé et le repérage des lignes de base. Aux tableaux IX à XIV ont été portées les largeurs des fissures sous diverses charges intéressantes à considérer. Les valeurs indiquées ont été obtenues par interpolation linéaire entre les valeurs mesurées aux

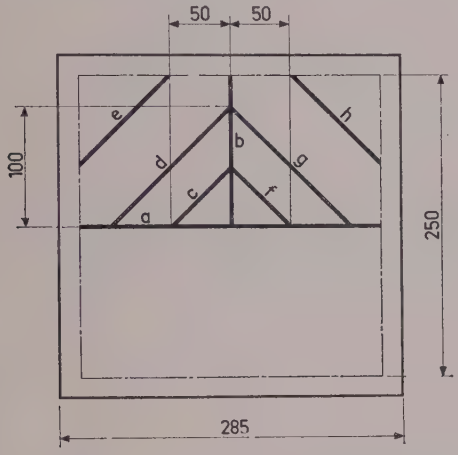

FIG. 41. — **Lignes de base de mesure des fissures dans les dalles simples.**

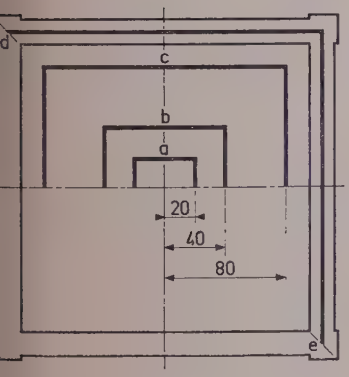

FIG. 42. — **Lignes de base de mesures des fissures dans le panneau nervuré BN 1 A**

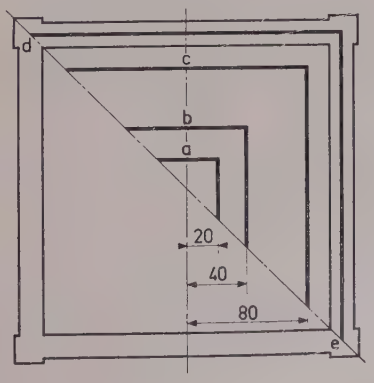

FIG. 43. — **Lignes de base de mesure des fissures dans les panneaux nervurés BN 9 A, 3 1/2 A et 5 1/4 A.**

TABLEAU IX

DALLES SIMPLES. LARGEURS DES FISSURES SOUS LA CHARGE DE SERVICE DE 4,4 t/m2

	Largeurs moyennes maximales		Largeurs maximales	
	Ligne de base	Largeur (mm/100)	Ligne de base	Largeur (mm/100)
BN 1	a	9	c	13
BN 9	e	4	a	9
BN 10	h	12	h	14
BN 2 1/2	h	8	h	10
BN 3 1/2	a	5	h	14
BN 5 1/4	h	12	h	24

TABLEAU X

PANNEAUX NERVURES. LARGEURS DES FISSURES SOUS LA CHARGE DE SERVICE DE 4,4 t/m2

		Largeurs moyennes maximales		Largeurs maximales	
		Ligne de base	Largeurs (mm/100)	Ligne de base	Largeurs (mm/100)
BN 1 A	poutres	e	4	e	8
	dalle	a	4	a	14
BN 9 A	poutres	e	9	e	15
	dalle	b	6	a	12
BN 3 1/2 A	poutres	d	6	e	19
	dalle	a	6	a	11
BN 5 1/4 A	poutres	e	5	d,e	9
	dalle	b	4	b	7

TABLEAU XI

DALLES SIMPLES. LARGEURS DES FISSURES SOUS LES CHARGES DE SERVICE ESPEREES , P_{se}

		Largeurs moyennes maximales		Largeurs maximales	
	P_{se} (t/m2)	Ligne de base	Largeur (mm/100)	Ligne de base	Largeur (mm/100)
BN 1	4,4	a	9	c	13
BN 9	4,4	e	4	a	9
BN 10	6,8	h	18	h	30
BN 2 1/2	5,7	h	12	h	20
BN 3 1/2	6,4	f	11	h	25
BN 5 1/4	9,6	h	25	h	62

TABLEAU XII

PANNEAUX NERVURES. LARGEURS DES FISSURES SOUS LES CHARGES DE SERVICE ESPEREES, P_{se}

	P_{se} (t/m2)		Largeurs moyennes maximales Ligne de base	Largeurs moyennes maximales (mm/100)	Largeurs maximales Ligne de base	Largeurs maximales (mm/100)
BN 1 A	4,4	poutres	e	4	e	8
		dalles	a	4	a	14
BN 9 A	4,4	poutres	e	9	e	15
		dalles	b	6	a	12
BN 3 1/2 A	5,2	poutres	d	9	e	20
		dalles	a	6	a	12
BN 5 1/4 A	5,2	poutres	e	7	e et d	14
		dalles	b	6	b	11

TABLEAU XIII

DALLES SIMPLES. LARGEURS DES FISSURES SOUS LES CHARGES D'ECOULEMENT THEORIQUES, P_{ec}

	P_{ec} (t/m2)	Largeurs moyennes maximales Ligne de base	Largeurs moyennes maximales (mm/100)	Largeurs maximales Ligne de base	Largeurs maximales (mm/100)
BN 1	8,4	a	25	a	50
BN 9	8,8	a	18	a	41
BN 10	9,1	a	27	a	35
BN 2 1/2	8,9	f	20	a, f et h	32
BN 3 1/2	9,0	f	21	h	35
BN 5 1/4	8,9	h	23	h	57

paliers de charge. Sur les lignes de base d'un même corps d'épreuve sous une charge donnée, les moyennes des largeurs des fissures coupées par chaque ligne ont des valeurs différentes. C'est la plus grande de ces moyennes qui, aux tableaux, est désignée par l'expression « Largeur moyenne maximale ». On peut voir au tableau XI que les largeurs de fissures sous charges de service espérées deviennent excessives pour les dalles non armées uniformément.

TABLEAU XIV

PANNEAUX NERVURES. LARGEURS DES FISSURES SOUS LES CHARGES D'ECOULEMENT THEORIQUES. P_{ec}

	P_{ec} (t/m2)		Largeurs moyennes maximales Ligne de base	Largeurs moyennes maximales (mm/100)	Largeurs maximales Ligne de base	Largeurs maximales (mm/100)
BN 1 A	9,0	poutres	e	27	e	120
		dalle	a	26	a	68
BN 9 A	9,2	poutres	d	50	d	111
		dalle	a	30	a	85
BN 3 1/2 A	8,8	poutres	d	35	d	148
		dalle	a	17	b	35
BN 5 1/4 A	9,0	poutres	e	30	d	70
		dalle	b	20	c	50

CONCLUSIONS

Commençons par remarquer que les deux types de corps d'épreuve soumis à l'essai fournissent des modèles des conditions d'équilibre extrêmes qui sont en pratique offertes aux panneaux de dalles des planchers nervurés. Les dalles simples correspondent à un panneau intermédiaire surchargé isolément; les panneaux nervurés aux panneaux d'angle et aussi aux panneaux de rive et intermédiaires situés au sein d'un groupe de panneaux surchargés. Dans le jugement que l'on peut tirer des essais on doit donc considérer ensemble dalles simples et panneaux nervurés.

1. Lorsque les aciers des dalles sont continus dans l'étendue de ces dernières et ancrés au-delà du contour, les charges ultimes dépendent uniquement du volume total de ces aciers et nullement de la distribution de leurs espacements. Si par conséquent on calcule les armatures au centre en fonction des conditions élastiques comme il est habituel, on ne peut « éclaircir » les armatures vers les bords sans diminuer la charge ultime. Ou si, à l'inverse, comme nous l'avons fait, on calcule une « charge de service espérée » en fonction du pourcentage d'armatures réalisé au centre, l'éclaircissement de ces armatures vers les bords réduit le coefficient de sécurité global, ou rapport entre charge ultime et charge de service espérée, par rapport à ce qu'il est pour un pourcentage uniforme.

2. Même si l'on admet la réduction du coefficient de sécurité global, en raison de ce qu'il est large, il ne paraît pas admissible de diminuer autant l'armature et sur des largeurs aussi grandes à partir des côtés qu'il a été fait dans les corps d'épreuve, tout en calculant les charges de service espérées comme il vient d'être dit. Ces charges conduisent à des flèches excessives et également à des largeurs de fissures excessives comme nous l'avons indiqué plus haut.

3. Dans l'hypothèse où l'on ne veut pas diminuer le rapport de la charge ultime à la charge de service et où par conséquent ces charges et la dépense d'acier sont celles des dalles uniformément armées, a-t-on intérêt à utiliser le mode de ferraillage par bandes pour resserrer les aciers vers le centre?

Les flèches sous charge et résiduelles s'exagèrent pour les panneaux à forte concentration centrale d'armatures (tableaux VII et VIII, BN 3 1/2 A et 5 1/4 A).

La fissuration tend à devenir importante dans les régions d'angle peu armées des dalles à forte concentration centrale d'armatures (tableau IX, ligne h, spécialement BN 5 1/4).

Le seul avantage d'une forte concentration est un retard à la première plastification (fig. 37, dalle BN 5 1/4); il est compensé par les inconvénients relatifs aux flèches et à la fissuration.

En revanche il ne semble y avoir aucun inconvénient, ni aucun avantage particulier à resserrer modérément les aciers vers le centre (BN 2 1/2 et BN 2 1/2 A).

4. Lorsque l'on a affaire à des surcharges réparties et peu variables, le mode de calcul d'une « charge de service espérée » par les conditions élastiques au centre est sans doute admissible si l'éclaircissement des aciers sur les bords, soit par bandes, soit par arrêt de barres aux bords d'un carré central surarmé, demeure suffisamment modéré, car le comportement en service peut rester bon et le coefficient de sécurité global suffisant. Mais les essais que nous venons de décrire, qui mettent en garde contre les éclaircissements excessifs, ne nous permettent pas d'apprécier dans quelles proportions et sur quelles largeurs on peut sainement « éclaircir ».

RÉFÉRENCES

1. The structural use of reinforced concrete on buildings. *British Standard code of practice.* CP 114 : 1957, reset and reprinted 1965.
2. R. Taylor, D.R.H. Maher and B. Hayes. Effect of the arrangement of reinforcement on the behaviour of reinforced concrete slabs. *Magazine of concrete research.* Juin 1966.
3. J. R. Robinson et M. Pommeret. Un cas de rupture généralisée de l'adhérence de l'armature dans une dalle carrée en béton armé uniformément chargée. *Annales de l'I.T.B.T.P.* Juillet-août 1967.
4. K. W. Johansen. Yield line theory. Traduit du danois. *Cement and Concrete Association.* Londres 1962.
5. R. H. Wood. Plastic and elastic design of slabs and plates. *Thames and Hudson.* Londres 1961.

ANNEXE

I. CALCUL DES CHARGES DE SERVICE

Nous calculons ces charges d'après les règles CC BA 68, c'est-à-dire dans l'hypothèse de l'élasticité avec un coefficient d'équivalence égal à 15. La limite d'élasticité garantie de l'acier Tentor étant de 4 500 kgf/cm², sa contrainte admissible $\bar{\sigma}_a$ est de 3 000 kgf/cm². Eu égard aux précautions d'exécution et aux mesures de contrôle, les hauteurs utiles h des sections des dalles simples et des dalles des panneaux peuvent être estimées avoir été égales à 8,3 cm dans un sens et à 7,1 cm dans le sens perpendiculaire. C'est cette dernière valeur qu'il convient de retenir, puisque qu'elle correspond aux aciers les plus sollicités. D'autre part, le moment fléchissant m développé par unité de longueur au centre d'une dalle carrée de côté l articulée sur son contour, par une charge d'intensité, p, par unité de surface est égal, compte tenu d'un coefficient de Poisson de 0,15, à :

(1) $$m = 0{,}0423\, pl^2.$$

Connaissant $\bar{\sigma}_a$ et h on peut calculer le moment admissible $\overline{m}$ au centre, compte tenu de l'espacement effectif, t, des armatures en ce point et de là, par la formule (1), la charge admissible ou de service $\bar{p}$. Ce calcul ne soulève pas d'objection pour les dalles à ferraillage uniforme N° 1 et 9. Il donne pour les autres dalles une valeur de p que nous appellerons, à titre d'hypothèse de travail, charge de service espérée. Les étapes et les résultats de ce calcul figurent au tableau AI.

TABLEAU AI

CHARGES DE SERVICE ESPEREES DES DALLES

REPERES BN		1 et 9	10	$2\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$	$5\frac{1}{4}$
Espacement t	(cm)	12,5	7,8	9,4	125/15	5,2
ϖ = 0,7854/7,1 t		0,00885	0,01418	0,01177	0,01327	0,02127
Bras de levier z	(cm)	6,16	5,98	6,05	6,01	5,82
$\overline{m} = 3000.7{,}1\, \varpi z$	(kg)	1160	1810	1520	1700	2530*
$\bar{p} = \overline{m}/0{,}0423.\overline{2{,}50}^2$	(t/m2)	4,4	6,8	5,7	6,4	9,6

* limité par la résistance du béton

Pour un panneau la charge de service de l'ensemble peut être limitée par les poutres et non par la dalle. On peut évaluer le moment admissible dans une poutre par la formule approchée

(2) $$\overline{M} = 0{,}93\, hA\, \bar{\sigma}_a$$

où, h, hauteur utile, est égale à 30 cm;
A, section de l'armature, est égale à 4,02 cm²,
et $\bar{\sigma}_a$, contrainte admissible de l'armature, à 3 000 kgf/cm².
On trouve $\overline{M} = 3\,360$ kgm.

Si l'on admet que la distribution des réactions de la dalle sur une poutre est triangulaire, la charge admissible sur l'ensemble d'un panneau du fait des poutres, est égale à

(3) $$\bar{p} = 24\, \overline{M}\, /l^3$$

Soit avec $l = 2{,}50$ m

$$\bar{p} = 5{,}2 \text{ t/m}^2.$$

La charge de service demeure limitée par les dalles à 4,4 t/m² pour les panneaux 1 A et 9 A. Elle l'est par les poutres à 5,2 t/m² pour les panneaux 3 1/2 A et 5 1/4 A en prenant cependant le caractère de charge de service espérée. La récapitulation de ces charges de service figure au tableau A II.

TABLEAU A II

CHARGES DE SERVICE ESPEREES DES PANNEAUX NERVURES

REPERES BN		1 A	9 A	$3\frac{1}{2}$ A	$5\frac{1}{4}$ A
Limitées par les dalles	(t/m2)	4,4	4,4		
Limitées par les poutres	(t/m2)			5,2	5,2

II. CALCUL DES CHARGES D'ÉCOULEMENT

Pour une dalle simple uniformément armée, telle que BN 1 ou BN 9, les lignes charnières du mécanisme d'écoulement sont les diagonales étant donné que la formation de bascules aux angles est pratiquement empêchée (fig. A 1-*a*).

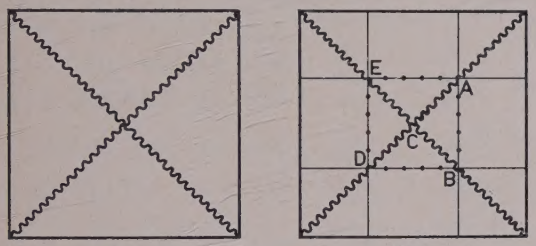

FIG. A 1. — **Lignes charnières des dalles :**
***a*) uniformément armées,**
***b*) armées par bandes.**

L'application du théorème des travaux virtuels conduit à la relation :

$$p_e = 24\, m_{u,\,cal}/l^2 \tag{4}$$

où p_e est la charge d'écoulement calculée, et $m_{u,\,cal}$ le moment de plastification des charnières calculé par unité de longueur.

Pour une dalle armée par bandes, le mécanisme d'écoulement pourrait être, à première vue, constitué des diagonales ou bien du contour A B D E du carré commun aux deux bandes (fig. A 1-*b*) et des tronçons de diagonales extérieurs à ce carré. Mais pour une même rotation des éléments plans de la dalle adjacentes aux côtés, la dissipation d'énergie dans les charnières des deux mécanismes envisagés est la même, alors que le travail de la charge appliquée est supérieur dans le premier. C'est donc celui-ci, constitué des diagonales, qui est le mécanisme d'écoulement. Il est le même que pour les dalles uniformément armées. Par ailleurs, le moment de plastification d'une charnière d'une longueur d sur laquelle les aciers sont uniformément espacés est :

$$dm_{u,\,cal} = \nu A\, \sigma_e\, x \tag{5}$$

expression où :

ν est le nombre des aciers rencontré sur la longueur d;

A leur section individuelle;

σ_e leur limite d'élasticité;

x le bras de levier du couple intérieur.

On sait que x, pour une hauteur donnée de section rectangulaire, ne dépend que très peu du pourcentage d'acier. Si on néglige l'influence de ce dernier, comme l'autorise la précision cherchée, on en conclut que l'expression (5) est valable pour une distribution non uniforme d'aciers le long de la ligne charnière. Ainsi la formule (4) peut s'écrire :

$$p_e = 24\, lm_{u,\,cal}/l^3 = 24\, \nu A\, \sigma_e\, x/l^3 \tag{6}$$

ν représentant ici le nombre de barres d'une nappe d'armatures. La formule (6) est applicable aux dalles armées par bandes aussi bien qu'aux dalles uniformément armées, le nombre n étant égal à 20 pour toutes les dalles.

Nous évaluerons x par la théorie du diagramme rectangulaire :

$$x = 1 - \frac{\varpi_1}{2} \tag{7}$$

ϖ_1, pourcentage mécanique, étant pris égal à sa valeur moyenne :

$$\varpi_1 = \frac{\nu\, A\, \sigma_e}{h\, l\, \sigma'_j} \tag{8}$$

σ'_j étant la résistance du béton. La hauteur utile h sera prise égale à la moyenne des hauteurs utiles relatives aux deux nappes d'armatures, c'est-à-dire à 7,7 cm.

Le calcul des charges p_e est résumé au tableau A III.

En ce qui concerne la dalle simple BN 10 avec carré central surarmé, son mécanisme d'écoulement se compose du contour du carré central et des segments des

diagonales de la dalle extérieure au carré central (fig. A 2). Le travail de dissipation d'énergie du mécanisme pour une flèche du carré central égale à l'unité est égal à :

$$4\,\nu A\,\sigma_e\,x\,\frac{2}{l-c}$$

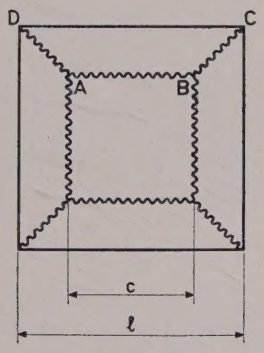

FIG. A 2. — **Lignes charnières de la dalle BN 10 à carré central surarmé.**

n étant le nombre des aciers d'une nappe qui aboutissent aux côtés de la dalle et c le côté du carré central. Le travail de la charge extérieure est égal à :

$$\frac{1}{3}\,(l^2 + c^2 + lc)\,p_e$$

En égalant ces deux expressions, l'on obtient :

(9) $$p_e = 24\,\nu A\,\sigma_e\,x/(l-c)\,(l^2 + c^2 + lc)$$

Dans la dalle BN 10 le nombre ν est égal à 16 et c, mesuré entre intérieurs des crochets des aciers additionnels du centre, est égal à 1,47 m. Le calcul de p_e est résumé au tableau A III.

Dans le cas d'un panneau, le mécanisme d'écoulement comprend une ligne charnière, tracée suivant l'axe de symétrie normal à deux côtés suivant lequel la résistance à la flexion de la dalle est la moins grande (fig. A 3). Pour une flèche unité à la charnière, le travail des forces extérieures est égal à :

$$p_e\,\frac{l^2}{2}$$

TABLEAU A III

CHARGES D'ECOULEMENT DES DALLES SIMPLES

REPERES BN		1	9	10	$2\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$	$5\frac{1}{4}$
$\nu A\,\sigma_e$	(t)	75,9	79,3	64,1	80,4	80,9	80,6
$h^2\,\sigma'_j$	(t)	606	680	680	612	674	645
ϖ_1		0,125	0,117	0,094	0,131	0,120	0,125
$x = 7,7\,(1-\frac{\varpi_1}{2})$	(cm)	7,22	7,25	7,34	7,19	7,24	7,22
$p_e = \frac{24\,\nu A\sigma_e x}{l^3}$	(t/m2)	8,4	8,8	"	8,9	9,0	8,9
$p_e = \frac{24\,\nu A\sigma_e x}{(l-c)(l^2+c^2+lc)}$	(t/m^2)	"	"	9,1	"	"	"

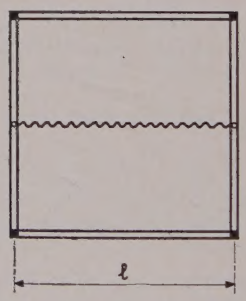

FIG. A 3. — **Ligne charnière d'un panneau nervuré posé sur ses angles.**

et le travail des forces intérieures à :

$$\frac{4}{l}\,(\nu A\,\sigma_e\,x + 2\,M)$$

M étant le moment d'écoulement plastique d'une poutre de bordure et les autres symboles gardant les mêmes significations que ci-dessus. En égalant ces deux expressions, on trouve :

(10) $$p_e = \frac{8}{l^3}\,(\nu A\,\sigma_e\,x + 2\,M)$$

TABLEAU A IV

CHARGES D'ECOULEMENT DES PANNEAUX NERVURES

REPERES BN		1 A	9 A	$3\frac{1}{2}$ A	$5\frac{1}{4}$ A
$\nu A \sigma_e$ (t)		79,6	82,6	77,9	78,2
$h \ell \sigma'_j$ (t)	(h = 7,1	575		579	579
	(h = 7,7		591		
ϖ_1		0,138	0,140	0,135	0,135
x (cm)	(h = 7,1	6,61		6,62	6,62
	(h = 7,7		7,16		
$\nu A \sigma_e x$ (kgm)		5260	5920	5160	5180
$M = 0,295 - 4,02\ \sigma_{ep}$ (kgm)		6160	6040	5990	6210
$P_e = \frac{8}{\ell^3}(\nu A \sigma_e x + 2M)$ (t/m2)		9,0	9,2	8,8	9,0

Le calcul du bras de levier du couple intérieur x de la section d'une dalle par la ligne charnière doit prendre en compte la plus petite hauteur utile de section relative à une nappe d'armatures, soit 7,1 cm, pour les panneaux BN 1 A, 3 1/2 A et 5 1/4 A dont les armatures sont parallèles au côté. Pour le panneau BN 9 A dont les armatures de la dalle sont inclinées à 45° sur les côtés, il y a deux charnières possibles, susceptibles de former un mécanisme alternatif (Réf 5) et il convient de prendre la hauteur utile moyenne des sections de la dalle, soit 7,7 cm. Quant au bras de levier du couple intérieur d'une poutre de bordure dont la hauteur utile est de 30 cm, nous admettrons qu'il puisse être évalué à 29,5 cm. La section des armatures d'une poutre étant de 4,02 cm² on aura :

$$M = 0,295.4,02\ \sigma_{ep} \text{ (kg m)} \qquad (11)$$

la limite d'élasticité des armatures, σ_{ep}, étant évaluée en kgf/cm². Les calculs des charges d'écoulement sont résumés au tableau A IV.

Édité par la Société de Diffusion des Techniques
du Batiment et des Travaux Publics,
9, rue La Pérouse, Paris-XVIe

(*Ann. I.T.B.T.P.*)

5554-11-70. IMPRIMERIE FIRMIN-DIDOT. — PARIS - MESNIL - IVRY
Dépôt légal : 4e trimestre 1970.

Le Directeur-Gérant : J.-P. Arathoon.

Code 2101